

Oxy-combustion de l'hythane dans un brûleur à jets séparés

S. Yon^a, J.C Sautet^a

a. CORIA UMR 6614 CNRS-Université de Rouen, Avenue de l'Université-BP12
76801 Saint Etienne du Rouvray, Cedex, (France)

Résumé :

Les effets de l'ajout d'hydrogène et de la baisse de la richesse sur une oxy-flamme non-prémélangée turbulente sont étudiés dans le cas d'un brûleur à deux jets fortement séparés, le premier débitant de l'hythane (Gaz Naturel+Hydrogène) et le second de l'oxygène pur. La visualisation de l'émission du radical OH montre que l'ajout d'hydrogène et la diminution de la richesse permettent de réduire la hauteur d'accrochage et la longueur de la flamme ainsi que ses fluctuations. L'étude de l'aérodynamique en milieu non-réactif via la PIV montre que ces deux paramètres favorisent le mélange des jets et la diminution de la taille de la zone de recirculation.*

Abstract :

The hydrogen addition effects and the equivalence ratio decrease on a turbulent diffusion oxy-flame are studied in burner with two separated jets, the first debiting hythane (Natural Gas+Hydrogen) and the second of pure oxygen. The OH radical emission visualization shows that the hydrogen addition and the equivalence ratio decrease allow to reduce the flame lift-off height, the flame length and the fluctuations. The aerodynamic study in non-reactive flow thanks to PIV shows that these parameters favour the jets combination and the decrease of the recirculation zone.*

Mots clefs: hythane, oxy-combustion, jets séparés, stabilisation

1 Introduction

Une nouvelle génération de brûleur à injections fortement séparées de combustible et de comburant possède un très grand intérêt pour les industriels. Même si ce type de brûleur a prouvé son efficacité en terme de limitation des émissions d'oxyde d'azote [1], l'effet de dilution géométrique liée au fort taux de recirculation des gaz brûlés engendré par la séparation des injecteurs est limité par l'instabilité de la flamme. La substitution totale de l'air par de l'oxygène pur, appelée l'oxy-combustion, et l'utilisation d'un mélange de gaz naturel et d'hydrogène, nommé l'hythane, permettent de palier à ces instabilités de la flamme.

Dans une combustion à l'air, l'azote entraîne un rendement de combustion faible et une consommation énergétique élevée puisque l'azote agit comme un ballast thermique. L'oxy-combustion permet d'augmenter la vitesse de combustion laminaire jusqu'à 1300% [2], d'améliorer le rendement thermique, d'accroître la température adiabatique de flamme (2200K pour une flamme CH₄-air, 3090K en oxy-combustion) [3], d'étendre les limites d'inflammabilité de plus de 450% [4], de diminuer les consommations de carburant de 50% et d'un point de vue environnemental de réduire la formation d'oxyde d'azote de plus de 95% [5].

L'hythane est un enrichissement du gaz naturel par de l'hydrogène jusqu'à 20% en volume. L'utilisation d'un mélange de combustible et d'hydrogène possède l'avantage de modifier sensiblement les propriétés du combustible tout en préservant les installations de distribution existantes. Du fait des propriétés de l'hydrogène en combustion, à savoir une haute diffusivité moléculaire, une forte inflammabilité, une haute vitesse de combustion laminaire et une faible énergie d'allumage [6,7], l'ajout d'hydrogène permet d'effectuer une combustion en régime pauvre ($\Phi < 1$). L'augmentation des limites d'inflammabilité en présence d'hydrogène compense les effets néfastes d'une combustion à faible richesse à savoir l'apparition d'extinctions locales, la perte d'énergie par rayonnement ainsi que l'étirement de la flamme [8-10].

Des travaux précédents ont prouvé l'efficacité des brûleurs à jets séparés en oxy-combustion pour contrôler les jets afin d'améliorer le mélange en sortie des injecteurs [11]. Offrant des perspectives intéressantes en

termes de consommation de carburant, l'utilisation de ce type de brûleur en régime globalement pauvre nécessite une bonne compréhension des effets de la diminution de la richesse du mélange et de l'ajout d'hydrogène sur la stabilité de la flamme.

2 Dispositif expérimental et techniques de mesures

2.1 Le brûleur, le système de contrôle et le four

Le brûleur représenté sur la figure 1 est composé de deux jets non ventilés, séparés de 60 à 100 mm et de diamètre intérieur $\phi=6$ mm. Un des injecteur transporte le combustible, l'hythane ; l'autre l'oxygène pur. La puissance du brûleur varie de 17.5 à 25 kW selon la richesse du mélange (de $\Phi=0.7$ à $\Phi=1$). Le débit volumique d'oxygène est fixe quelle que soit la configuration (1.45 L.s^{-1}) correspondant au débit calculé pour une puissance de 25 kW à la stœchiométrie. La régulation des débits de gaz naturel est réalisée par un régulateur de débit massique et ceux d'oxygène et d'hydrogène par des cols soniques et des détendeurs. Le confinement du brûleur est opéré dans un four à base carrée de $60 \times 60 \text{ cm}^2$ et de 1 m de hauteur. Afin d'offrir des accès optiques à toutes les hauteurs, six ouvertures ont été pratiquées sur chaque parois de la chambre de combustion.

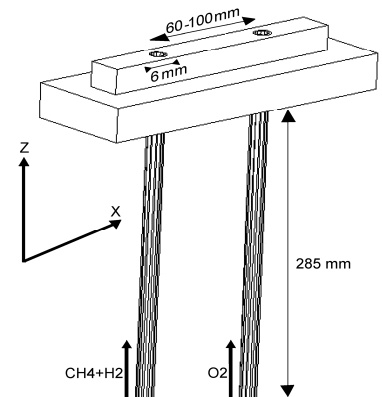


FIG. 1 – Schéma du brûleur à jets séparés

2.2 Techniques de mesures

2.2.1 Etude en milieu réactif

Les structures de la zone d'accrochage, de la fin de flamme ainsi que les fluctuations du front de flamme sont étudiées par collection de la chimiluminescence du radical OH^* sur la bande principale (0-0) à 306.4 nm. Afin de visualiser le radical OH^* , le dispositif d'acquisition est composé d'une caméra CCD intensifiée munie d'un capteur CCD 16 bits ($512 \times 512 \text{ pixel}^2$). Pour permettre le calcul de grandeurs statistiques, chaque mesure est effectuée par collection de 500 images instantanées afin d'obtenir la position moyenne et les fluctuations des différentes zones de la flamme étudiées.

Pour déterminer la position d'accrochage, il est nécessaire d'effectuer une binarisation puis une détection du contour de chaque image. Le seuil de binarisation permet d'éliminer le bruit de l'image mais nécessite des précautions pour ne pas altérer le signal de l'image. Le point d'accrochage de la flamme est défini comme étant le point le plus proche de l'injecteur où le signal apparaît. L'image moyenne et les fluctuations sont calculées à partir des images instantanées. La figure 2 illustre un exemple de traitement statistique d'images de l'émission OH^* dans la zone d'accrochage.

La hauteur de fin de flamme est déterminée à partir du même dispositif. Après la binarisation de chaque image, le pixel le plus haut est assimilé à la position de la fin de flamme. La longueur de flamme L_f est ainsi évaluée à partir de l'équation 1:

$$L_f = Z_0 + \sum_{i=1}^n Z_i / n \quad (1)$$

avec Z_0 la distance entre la sortie du brûleur et le début du champ de visualisation, Z_i la hauteur de flamme dans l'image et n le nombre d'image traitées. La figure 3 donne un exemple de traitement de la hauteur de fin de flamme.

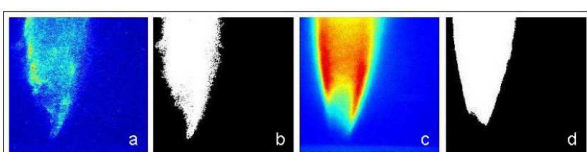


FIG. 2 – Emission OH^* dans la zone d'accrochage :
(a) Image instantanée et (b) binarisée,
(c) Moyenne de 500 images instantanées et
(d) Moyenne binarisée



FIG.3 – (a) Exemples d'images instantanées d'émission OH^* en fin de flamme,
(b) Images binarisées

2.2.2 Etude en milieu non-réactif

Afin d'étudier l'aérodynamique de l'écoulement en fonction de la richesse et des concentrations d'hydrogène, la vélocimétrie par image de particules (P.I.V) est utilisée. Cette méthode de mesure non-intrusive permet d'obtenir des photographies d'un plan de l'écoulement et d'en déduire les champs bidimensionnels de vitesses instantanées. Pour des raisons de sécurité, l'oxygène et le gaz naturel sont remplacés par de l'air [12].

Le dispositif expérimental pour la mise en place de la technique de mesure P.I.V nécessite un laser de type Nd-Yag bi-pulses de longueur d'onde 532 nm et de fréquence 10 Hz. L'épaisseur de la nappe laser éclairant l'écoulement est de 500 μm . Une Caméra CCD de résolution 1280x1024 pixels² et de dynamique de 12 bits et placée perpendiculairement à la source lumineuse, capte le signal de diffusion de Mie émis par les particules d'huile d'olive [13] ensemençant l'écoulement. Les impulsions émanant du laser sont synchronisées avec l'ouverture de la caméra CCD. En ce qui concerne les mailles de calcul, un premier calcul avec une résolution 64x64 pixels² avec un taux de recouvrement de 50% est effectué, suivi d'un second d'une résolution de 32x32 pixels² avec le même taux de recouvrement afin d'affiner les résultats.

Pour améliorer la résolution spatiale, il est nécessaire de réaliser les mesures P.I.V selon 4 hauteurs différentes. Ainsi, les différentes zones pertinentes de l'écoulement sont étudiées, à savoir la zone de convergence située à la sortie du brûleur; la zone de fusion où les jets se mélangent et entrent en interaction ; la zone de combinaison à partir de laquelle l'écoulement tend à avoir le comportement similaire à celui d'un jet simple.

Le traitement de 200 couples d'images permet ainsi d'obtenir 200 champs de vecteurs vitesse instantanée pour chaque hauteur et configuration. Ces champs instantanés sont ensuite moyennés pour avoir un champ moyen bidimensionnel de vitesse (figure 4).

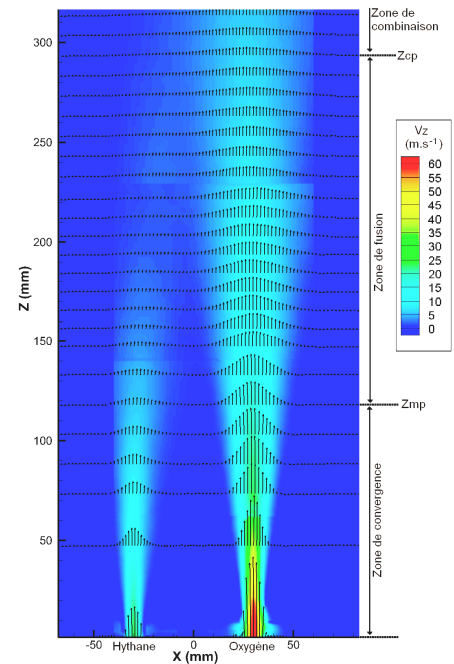


FIG.4 – Exemple de champ moyen bidimensionnel de vitesse

3 Résultats et interprétation

3.1 Zone d'accrochage

L'étude de la zone d'accrochage est effectuée par collection de l'émission du radical OH*. Les influences de l'ajout d'hydrogène au gaz naturel (de 0% à 20% en fraction volumique) et de la diminution globale du mélange (de $\Phi=1$ à $\Phi=0.7$) sont ainsi étudiées pour différents écartements des deux jets (60 mm à 100 mm).

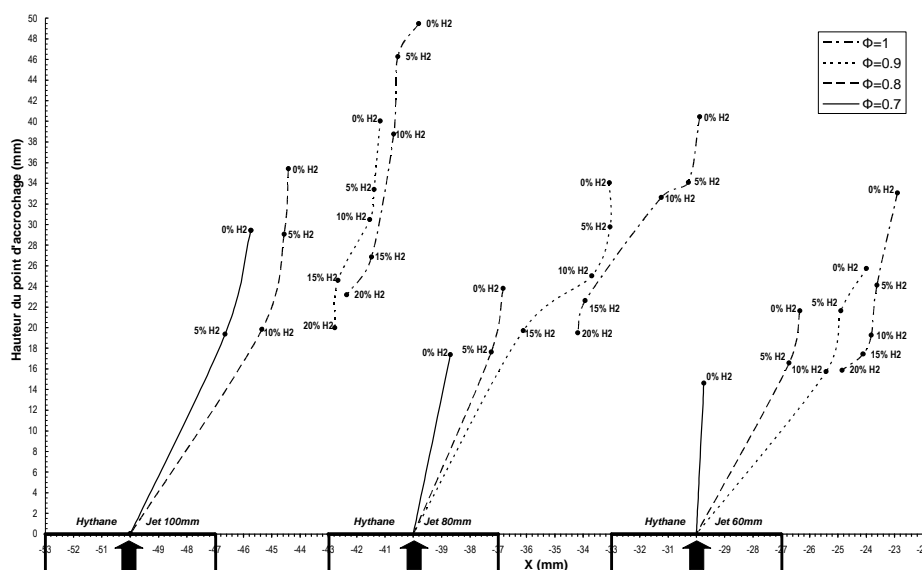


FIG.5 – Evolution de la position de l'accrochage de la flamme dans le plan (XZ), en fonction de la fraction d'hydrogène, de la richesse du mélange et de l'écartement entre les jets.

La figure 5 représente l'évolution de la position d'accrochage de l'oxy-flamme dans le plan (XZ) en fonction des différents paramètres. D'après ce graphique, les hauteurs d'accrochage moyennes de la flamme décroissent lorsque le pourcentage d'hydrogène augmente. L'addition d'hydrogène augmente la vitesse du jet de combustible ainsi que la différence de densité entre les jets et favorise par conséquent le mélange des réactifs en sortie d'injecteurs, permettant l'accrochage de la flamme plus en amont de l'écoulement.

Cette figure montre également que les régimes les plus pauvres tendent à faire diminuer les hauteurs d'accrochage de la flamme. Lorsque les régimes de combustion sont plus faibles, le débit d'oxygène est conservé mais le débit d'hythane décroît. De ce fait le jet d'oxygène a tendance à confiner le jet de combustible, ce qui provoque l'accrochage de la flamme plus tôt dans l'écoulement.

L'augmentation de l'écartement des jets retarde l'interaction de l'hythane avec l'oxygène. La hauteur d'accrochage se situe donc plus en aval de l'écoulement lorsque l'écart entre les injecteurs croît.

La position du bas de flamme selon l'axe horizontal tend vers l'injecteur à mesure que la hauteur d'accrochage se rapproche des lèvres du brûleur. Plus le bas de flamme est haut dans l'écoulement plus celui-ci est éloigné de l'injecteur d'hythane dans le plans (XZ).

A partir de l'étude de l'écart type des positions d'accrochage en fonction du pourcentage d'hydrogène suivant différentes richesses (figure 6), il est possible d'en déduire l'évolution de la stabilité de la combustion en bas de flamme. Ce graphique met en évidence que le confinement du jet d'hythane, lié à la diminution de la richesse du mélange, et les caractéristiques en combustion de l'hydrogène favorisent la réduction des fluctuations de l'accrochage de la flamme. En ce qui concerne l'influence de l'écartement jets, une forte séparation des injecteurs engendre des instabilités importantes dans la zone d'accrochage.

3.2 Longueur de flamme

Caractéristique macroscopique importante permettant de rendre compte de la qualité du mélange et de la stabilité de la flamme, la longueur de flamme est étudiée par collection du radical OH*.

Représentant l'évolution de la position du haut de flamme en fonction des différents paramètres, la figure 7 met en évidence que l'ajout d'hydrogène n'a aucune influence sur la longueur de flamme. En revanche ce combustible permet de diminuer en moyenne de 17% les fluctuations du haut de flamme (figure 8). Les propriétés en combustion de l'hydrogène limitent les étirements du haut flamme et réduisent ainsi les instabilités.

La croissance des vitesses liées à l'augmentation des richesses et un plus grand écartement des jets retardant l'interaction des jets sont deux paramètres qui font croître la longueur de flamme (figure 6). Leurs effets sont également importants en ce qui concerne les fluctuations du haut de flamme puisque, d'après la figure 7, la diminution de la richesse (de $\Phi=1$ à $\Phi=0.7$) réduit de près de 26% en moyenne l'écart type et l'augmentation de l'écartement des injecteurs (de 60 mm à 100 mm) engendre une plus forte instabilité (+45%) de la flamme dans cette région.

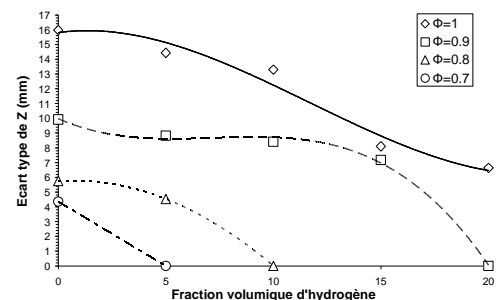


FIG.6 – Fluctuation de la hauteur d'accrochage en fonction de la fraction volumique H_2 et de la richesse. (Jet 80 mm)

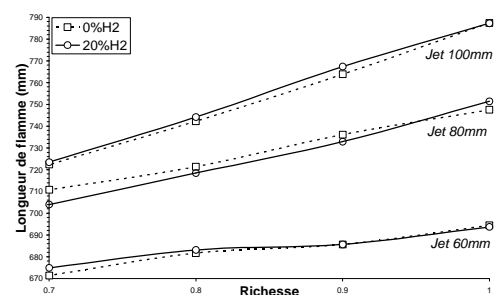


FIG.7 – Evolution de la longueur de flamme selon la richesse, la fraction volumique H_2 et l'écartement des jets

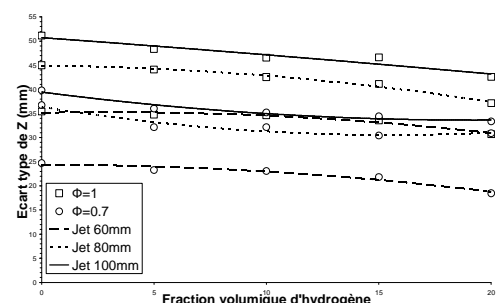


FIG.8 – Fluctuation la longueur de flamme selon la fraction volumique H_2 , la richesse et l'écartement des jets

3.3 Ecoulement non réactif: zone de convergence, de fusion et de combinaison

3.3.1 Zone de convergence des jets

A partir des données issues de la P.I.V, il est possible d'étudier l'évolution de la hauteur du début de la zone de fusion des jets Z_{mp} , c'est-à-dire la région où les jets se mélangent et entrent en interaction et où se situe la zone de recirculation.

Pour chaque richesse et concentration d'hydrogène, la figure 8 montre que la hauteur de fusion des jets Z_{mp} diminue lorsque le pourcentage d'hydrogène augmente. Cette décroissance atteint 15,7% lorsque 20% d'hydrogène est ajouté à la stœchiométrie. La forte diffusivité de l'hydrogène va favoriser le mélange entre les jets et réduire la hauteur de la zone de fusion.

Concernant l'effet de la richesse du mélange, une diminution de la richesse entraîne une réduction de la hauteur de mélange (-17% de $\Phi=1$ à $\Phi=0.7$). En régime pauvre ($\Phi < 1$), la diminution du débit va permettre au jet de combustible de fusionner plus rapidement avec celui d'oxygène. La différence de vitesse entre ces deux écoulements augmentant, la déviation du jet de combustible vers celui de comburant va croître : les jets se mélangent plus en amont.

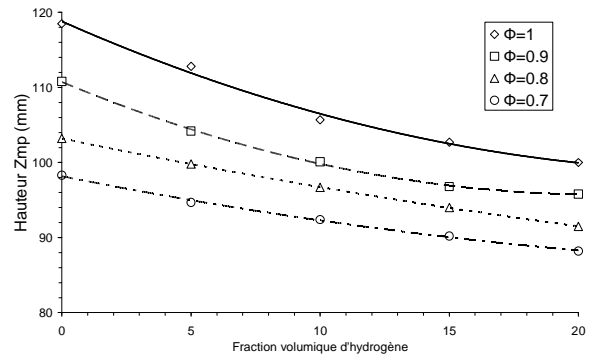


FIG.8– Evolution de la hauteur Z_{mp} en fonction de la fraction volumique H₂, pour différentes richesses (Ecartement 60 mm)

3.3.2 Zone de fusion et qualité du mélange

Dans le cas d'un jet simple, l'étude de la décroissance de la vitesse le long de l'axe permet d'obtenir la longueur du cœur de potentiel, hauteur à partir de laquelle le jet interagit avec l'extérieur. Il est donc intéressant d'utiliser cette caractéristique sur le jet de combustible pour déterminer l'influence de l'ajout d'hydrogène sur l'interaction avec le jet de comburant.

Le long du jet du combustible, selon l'étude de Sautet [12], la mesure de l'inverse du taux de décroissance axiale des vitesses peut être effectuée en utilisant le rapport de la vitesse débitante U_0 sur la vitesse mesurée U_{cl} en fonction de l'abscisse réduite.

La constante de similarité K_U obtenue par Sautet, égale à 0.124 dans le cas de deux jets coaxiaux, est indépendante du jet étudié, même si la masse volumique initiale de celui-ci est très faible.

L'équation 2 permet d'obtenir l'inverse de la décroissance de la vitesse en fonction de l'abscisse réduite dans le cas d'un jet simple :

$$\frac{U_0}{U_{cl}} = K_U \frac{Z}{d} \sqrt{\frac{\rho_{ext}}{\rho_{jet}}} \quad (2)$$

avec Z la hauteur dans l'écoulement, d le diamètre de l'injecteur et ρ_{ext} et ρ_{jet} les masses volumiques respectives du fluide environnant et celle du jet considéré.

L'étude de l'inverse de la décroissance de vitesse du jet de combustible en fonction de l'abscisse réduite (figure 9) permet de mettre en évidence la qualité du mélange en présence d'hydrogène. Sur la figure 9, il est possible de constater que l'ajout d'hydrogène favorise la déviation des courbes de décroissance de vitesse vis-à-vis de celle de la loi de similarité. La force d'interaction du jet de comburant associée à la forte diffusivité de l'hydrogène permettent donc un mélange efficace entre les différents jets, ce qui favorise une combustion précoce et une meilleure stabilité de la flamme.

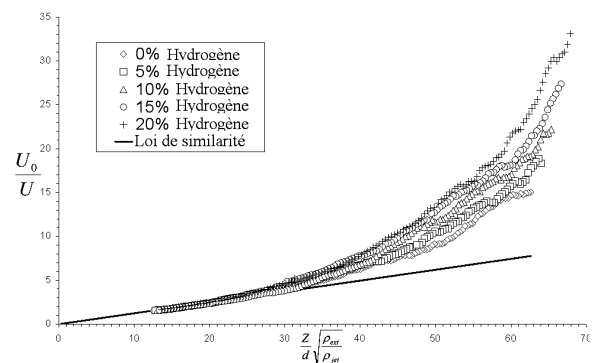


FIG.9 – Inverse de la décroissance des vitesses en fonction de l'abscisse réduite (pour une richesse de 0.8, Ecartement 60mm)

3.3.3 Zone de combinaison

Afin de déterminer le début de la zone de combinaison Z_{cp} , lorsque l'écoulement tend à avoir le comportement similaire à celui d'un jet simple, la position des vitesses maximales suivant chaque jet est repérée. La hauteur pour laquelle une seule vitesse maximale est présente marque le point Z_{cp} .

La figure 10 présente l'évolution de la hauteur Z_{cp} de combinaison des jets pour les différents paramètres étudiés. Ce graphique met en évidence que l'ajout d'hydrogène et la diminution de la richesse permettent une réduction significative de la hauteur du point Z_{cp} .

D'un point de vue purement aérodynamique, une richesse inférieure à un (régime pauvre) et un ajout d'hydrogène permettent donc à l'écoulement de tendre vers un jet simple plus rapidement qu'à la stœchiométrie.

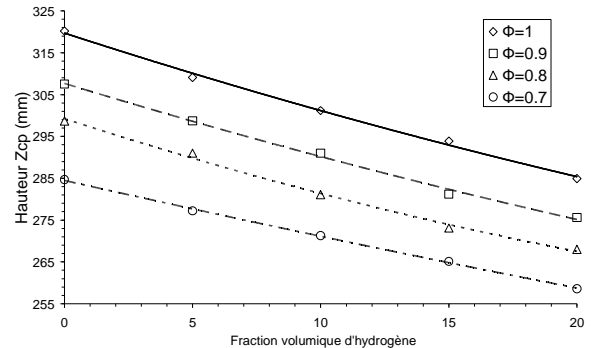


FIG.10–Evolution de la hauteur Z_{cp} en fonction de la fraction volumique H_2 , pour différente richesse (Ecartement 60 mm)

4 Conclusion

L'étude expérimentale des effets de l'hythane en oxy-combustion dans des jets séparés a permis de mettre en évidence que l'ajout d'hydrogène stabilise la zone d'accrochage ainsi que le haut de la flamme dans ce type de brûleur et pallie aux instabilités d'une combustion en régime pauvre. L'hythane permet un meilleur mélange des jets tout en conservant la même longueur de flamme. Dans ce type d'oxy-brûleur, l'hydrogène et une faible richesse permettent donc une combustion précoce, une meilleure stabilité de flamme et une diminution de la quantité de combustible introduite

Références

- [1] Sautet J.C., Boushaki T., Salentey L., Labégorre B., Oxy-combustion properties of interacting separated jets, *Combustion Science and Technology*, 178, 2075-2096, 2006.
- [2] Boushaki T., Du contrôle passif au contrôle actif : application à l'oxy-combustion dans des brûleurs à jets séparés, Thèse doctorale, Université de Rouen, 2007.
- [3] Perthuis E., La combustion industrielle, Edition Technip, Paris, 1983.
- [4] Salentey L., Etude expérimentale du comportement de brûleur à jets séparés : application à la recherche gaz naturel-oxygène pur, Thèse doctorale, Université de Rouen, 2002.
- [5] Genies B., L'oxydation, une solution attractive pour minimiser les émissions de NOx des procédés industriels, *Combustion et procédés industriels : comment réduire les émissions de NOx, rencontres et journées techniques*, A.D.E.M.E, 153-196, 1996.
- [6] Choudhuri A.R., Gollahalli S.R., Combustion characteristics of hydrogen-hydrocarbon hybrid fuels, *J.I. Hydrogen Energy*, 25, 451-462, 2000.
- [7] Cozzi F., Coghe A., Behavior of hydrogen-enriched non-premixed swirled natural gas flames, *J.I. Hydrogen Energy*, 31, 669-677, 2006.
- [8] Anderson D.N., Effect of Hydrogen Injection on Stability and Emissions of an Experimental Premixed Prevaporized Propane Burner, Report No.TM X-3301, NASA, 1975.
- [9] Tseng C.J., Premixed combustion of hydrogen/methane mixtures in a porous medium burner, *Proceeding of the 36th intersociety energy conversion engineering conference*. Savannah, GA, United States, 1, 589-94, 2001.
- [10] Briones A.M., Aggarwal S.K., Katta V.R., Effects of Hydrogen enrichment on the propagation characteristics of methane-air triple flames, *Combustion Flame*, 153, 367-386, 2008.
- [11] Faivre V., Poinot T., Experimental and numerical investigations of jet active control for combustion applications, *Journal of Turbulence* 5 2004, 025, 2004.
- [12] Sautet J.C., Effets des différences de densité sur le développement scalaire et dynamique des jets turbulents, Thèse de doctorat, Université de Rouen, 1992.